

**ESTABILIDAD DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA MEDIANTE  
TÉCNICAS DE CONMUTACIÓN EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
ESTABILIDAD DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA MEDIANTE  
TÉCNICAS DE CONMUTACIÓN EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN**

**AUTOR:  
JONATHAN ORLANDO PILLAJO QUIJIA**

**TUTOR:  
DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA**

**Quito, Febrero 2017**

Jonathan Orlando Pillajo Quijia

**ESTABILIDAD DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA MEDIANTE  
TÉCNICAS DE CONMUTACIÓN EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2017  
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



**Jonathan Orlando Pillajo Quijia** (Y'1992-M'04). Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Técnico Don Bosco. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en Estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia Mediante Técnicas de Conmutación en Sistemas de Transmisión Eléctrica.  
[jpillajoq@est.ups.edu.ec](mailto:jpillajoq@est.ups.edu.ec)

Dirigido por:



**Diego Francisco Carrión Galarza** (Y'1981-SM'12). Se graduó en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en 2010 y en la actualidad está trabajando para lograr su título de Doctor en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana - Medellín Colombia. Es profesor e investigador en la Universidad Politécnica Salesiana - Quito Ecuador. En la actualidad es miembro del Grupo de Investigación Girei (Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes - Smart Grid Research Group).  
[dcarrion@ups.edu.ec](mailto:dcarrion@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

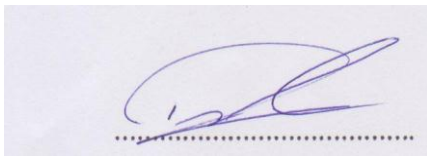
**DERECHOS RESERVADOS**

©2016 Universidad Politécnica Salesiana  
QUITO-ECUADOR

### **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A**

Yo, Diego Francisco Carrión Galarza declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *Técnicas de Conmutación en Sistemas de Transmisión como estrategia para mejorar la Estabilidad de Voltaje en los sistemas Eléctricos de Potencia* realizado por Jonathan Orlando Pillajo Quijia, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Febrero 2017



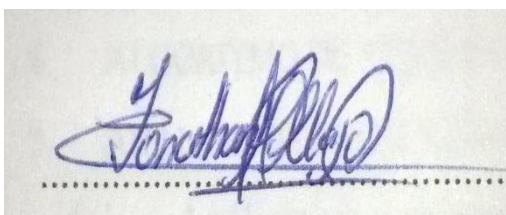
Diego Francisco Carrión Galarza  
Cédula de identidad: 1713703062

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo, Jonathan Orlando Pillajo Quijia, con documento de identificación N° 172204918-4, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: “Técnicas de Conmutación en Sistemas de Transmisión como estrategia para mejorar la Estabilidad de Voltaje en los sistemas Eléctricos de Potencia”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



Nombre: Jonathan Orlando Pillajo Quijia

Cédula: 172204918-4

Fecha: Quito, Febrero 2017

## INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN .....	2
2. TÉCNICAS DE CONMUTACIÓN APLICADAS A L/T PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD DE VOLTAJE. ....	3
2.1. Técnicas de conmutación .....	3
2.2. Estabilidad de voltaje .....	4
3. DESARROLLO DEL MODELAMIENTO DEL SISTEMA .....	4
3.1. Formulación matemática para flujos de potencia. ....	4
3.2. Formulación matemática para la estabilidad de voltaje basado en índices de estabilidad. ....	5
3.3. Desarrollo de optimización aplicada a técnicas de conmutación. ....	6
4. ALGORITMO DE RESOLUCIÓN .....	7
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS. ....	8
5.1. Análisis en condiciones iniciales del sistema. ....	8
5.2. Análisis del sistema frente a la salida abrupta de una L/T. ....	9
5.3. Análisis del sistema frente a la salida abrupta de dos L/T. ....	9
5.4. Análisis minimización de perdidas activas del sistema. ....	10
6. CONCLUSIONES. ....	10
REFERENCIAS .....	11
7. ESTADO DEL ARTE. ....	14

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Técnicas de Conmutación para sistemas de Transmisión para mejorar la estabilidad de voltaje .....	3
Figura 2. Modelo de las 14 Barras de la IEEE. ....	8
Figura 3. Datos iniciales de barras DigSILENT .....	8
Figura 4. Datos obtenidos frente a desconexión de una L/T. ....	9
Figura 5. Datos frente a desconexión de 2 L/T .....	10
Figura 6. Minimización de perdidas activas del sistema. ....	10
Figura 7. Indicadores del Estado del Arte – Temática .....	19
Figura 8. Indicadores del Estado del Arte – Formulación de Problema .....	19
Figura 9. Indicadores del Estado de Arte - Solución .....	19

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz del Estado del Arte .....	14
---	----

# ESTABILIDAD DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA MEDIANTE TÉCNICAS DE CONMUTACIÓN EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN

## Resumen

En este artículo se presenta un problema de optimización, donde se aplicará un Flujo Óptimo de Potencia (OPF) que incluirá las técnicas de conmutación, enfocado en la estabilidad de voltajes de las barras en el sistema de transmisión. La conmutación de transmisión es una técnica la cual podrá traer diversos beneficios al sistema como económicos, técnicos y principalmente manteniendo la continuidad del servicio eléctrico. Utilizando un modelo de programación no lineal (NLP) mediante el manejo del General Algebraic Modeling System (GAMS), para ello se trabajará en el modelo de las 14 Barras del IEEE y conjuntamente con el programa DigSilent se realizará las distintas pruebas y comparaciones de los datos adquiridos. Conjuntamente con el estudio los índices de estabilidad se podrán obtener mejores resultados en la parte de estabilidad de voltaje. Los resultados logrados de la presente investigación solucionó los problemas planteados, donde las técnicas de conmutación sirven correctamente frente a salidas de líneas de transmisión, respetando los voltajes p.u. en el margen operativo, reduciendo las pérdidas del sistema y así tener un sistema seguro, eficiente y confiable.

**Palabras Clave:** estabilidad de voltaje, índices de estabilidad, líneas de transmisión, Pérdidas del sistema, Técnicas de conmutación.

## Abstract

This article presents an optimization problem, where an Optimal Power Flow (OPF) will be applied, which will include the switching techniques, focused on the stability of busbar voltages in the transmission system. The transmission commutation is a technique that can bring various benefits to the system as economic, technical and mainly maintaining the continuity of the electric service. Using a nonlinear programming model (NLP) using the General Algebraic Modeling System (GAMS), this will work on the IEEE 14 Bar model and in conjunction with the DigSilent program the different tests and comparisons of the data acquired. In conjunction with the study the stability indexes will be able to obtain better results in the part of stability of voltage. The results obtained from the present investigation solved the problems posed, where the switching techniques serve correctly against outputs of transmission lines, respecting the voltages p.u. in the operational margin, reducing the losses of the system and thus have a safe, efficient and reliable system.

**Keywords:** stability indexes, Switching techniques, system losses, transmission lines, voltage stability.



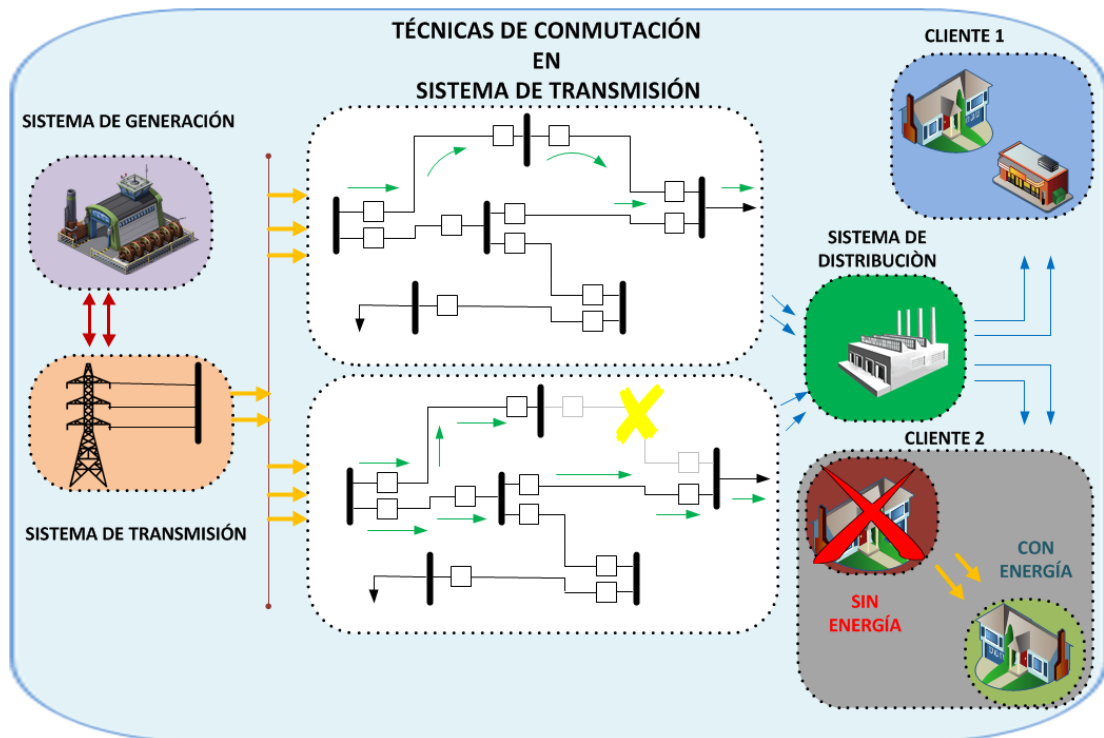
## 1. Introducción

En el sistema eléctrico de potencia (SEP) debido al continuo crecimiento de las interconexiones en la parte de transmisión tiende a una mayor complejidad en su funcionamiento mencionado en [1], [2]. Para ello los sistemas deben estar conjuntamente trabajando a las par con herramientas matemáticas que permitan tener una buena operación señalado en [3], [4]. Con las herramientas mencionadas se tiene un beneficio al instante de tomar decisiones frente a contingencias que ayuda que el sistema opere en su óptimo rendimiento señalado en [5].

Por lo señalado anteriormente, en el artículo se trabaja como base en el Flujo Optimo de Potencia (OPF) referenciado en [3], [5]. Ya que es una herramienta matemática primordial para el estudio de la investigación expuesta inicialmente, además se presenta un problema de optimización no lineal (NLP) mencionada en [1], [2], [4], con el objetivo de determinar u obtener valores óptimos de las variables involucradas y estas as u vez con sus respectivas restricciones de operación con el propósito de tener un mejoramiento en las condiciones del sistema descritas en [6], [7]. Como es la minimización de pérdidas activas del sistema que lo referencia [4], además se trabaja en el modelo de 14 barras de la IEEE y así emplear las técnicas de conmutación en la parte de transmisión que lo señalan [8]–[10].

Los autores en [4], [11], mencionan como los sistemas están aumentando tanto en la demanda, como en las interconexiones, esto significa que el sistema está operando en sus límites, con inestabilidades, inseguridad y más aún cuando existan contingencias mayores como es el caso de una salida abrupta de una línea o varias líneas de transmisión como lo menciona [11], [12]. Por lo tanto va enfocado a las condiciones señaladas anteriormente

para el presente artículo. Un procedimiento frente a la salida de una Línea de Transmisión son las Técnicas de conmutación, que sirve como un control al sistema para restaurar las tensiones en los nodos y suministrar la electricidad de una forma confiable después de un evento o fallo en la línea de transmisión descrito por [8], [11]. Las técnicas de conmutación y el modelado de optimización mejoraran el envío de generación a los nodos del sistema, obteniendo una reducción de pérdidas y la estabilidad de voltaje que menciona [12]. La conmutación de transmisión trae consigo grandes ayudas en cuanto a otros métodos de control como son la programación de unidades de generación de igual forma como el desprendimiento de cargas para la gestión frente a eventualidades que señalan [12], [13]. Esta técnica además es muy factible cuando se trata de estados del sistema, esto se refiere a sistemas que se encuentren o que estén en emergencia, además puede aliviar las sobrecargas y mantenerlo en los parámetros óptimos señalado en [13]. Además simultáneamente con las técnicas de conmutación se despliega otras metodologías para el estudio e investigación como son los índices de estabilidad, el cual es un factor que garantiza un óptimo funcionamiento con el objetivo de mantener estable los voltajes de las barras mencionado en [14], [15]. Por lo tanto el modelamiento del Flujo Optimo de Potencia demostrado en [16], trata que el voltaje se acerque al 1 p.u. en las barras, mediante los índices de estabilidad determina si el sistema esta vulnerable a sufrir un colapso como la salida de una línea o dos líneas de transmisión tal como señala [14], ayudando además a detectar las barras que estén llegando a sus límites de operación y detectar las áreas críticas para así mantener la estabilidad de voltaje en las barras descrito en [17].



**Figura 1.** Técnicas de Conmutación para sistemas de Transmisión para mejorar la estabilidad de voltaje

En adelante este artículo se organizará de la siguiente manera. En la Sección 2 se introduce las Técnicas de Conmutación aplicadas a Líneas de transmisión enfocado en la estabilidad de Voltaje. En la Sección 3 se describe la formulación del modelamiento del sistema. En la Sección 4 se realiza el Algoritmo del Modelamiento de Optimización de pérdidas. Finalmente se concluye en este artículo en la sección 5 donde se despliegan el Análisis de Resultados.

## 2. Técnicas de Conmutación aplicadas a L/T para mejorar la Estabilidad de Voltaje.

La Transmisión inteligente posee innumerables beneficios donde se puede optimizar al sistema para suministrar la energía eléctrica de forma fiable, ejecutada por medio de modelamientos matemáticos, variables y criterios de estudio, como son las técnicas de conmutación referenciadas

en [1], [2], [6]. La cual permitirá que la red de transporte de energía sea flexible para diferentes contingencias, eficaz al momento de transportar la energía eléctrica presentado en [14]. Para el modelamiento se tiene varios criterios de seguridad como límites de tensión, límites de estabilidad con el propósito de obtener la estabilidad de voltaje en las barras señalado en [15], [17], basándose para su solución en los índices de estabilidad señalado en [14].

### 2.1. Técnicas de conmutación

Las Técnicas de Conmutación en sus primeros estudios realizados su objetivo principal era reducir el desprendimiento de carga como lo señala [1], [2]. En futuras investigaciones las técnicas de conmutación fueron analizados para resolver otros problemas operacionales del sistema como lo mencionan [6], [8], como son las caídas de tensión, pérdida de la red y la seguridad del sistema. Que esta a su vez se comportará como una red inteligente en casos de fallas y de

manera inteligente cumplirá todas las restricciones dadas para que no se pierda su operación declarado en [18]. Además los autores en [17], [18], mostraron que la conmutación de transmisión proporciona acciones de control flexibles el cual es una ventaja enorme al hablar de estabilidad de voltaje.

## **2.2. Estabilidad de voltaje**

El sistema de transmisión referenciado en [17], menciona que la transmisión es una parte importante de un sistema eléctrico de potencia (SEP) así como los demás componentes, al igual que la estabilidad de voltaje que es una pieza clave ya que define la capacidad de un (SEP) para el funcionamiento y operación del sistema, manteniendo el voltaje en niveles aceptables o restaurar tensiones frente a varias contingencias que perturben su tarea mencionando en [19], [20]. Ya que la transmisión es el hilo conductor entre generadores y cargas por donde la potencia se transmite de un punto a otro punto, la cual está limitada por distintos criterios de operación como lo señala [21], tales como límites de tensión, límites de estabilidad e incluso límites térmicos de las líneas basados en [14], [21]. Al tener un sistema congestionado es posible que las unidades de generación no puedan ser despachadas en su totalidad, por lo que se enfrenta y se ve involucrado el estudio de la curva de estabilidad P-V mencionadas en [14], [17]. La curva de potencia activa – tensión (P-V), describe la utilización para establecer la estabilidad de tensión para un sistema eléctrico de potencia presentado en [3]. En [22], menciona que la potencia activa va tomando parámetros que varían lentamente acorde al voltaje en las barras de las cargas indicados en [23], [24]. De acuerdo a las curvas de estabilidad existen dos regiones en las cuales puede operar o no operar el sistema, una de ellas es la región estable

y la otra es la región inestable por lo tanto el sistema debe trabajar en la región óptima de estabilidad [3], [17], [22], [23].

## **3. Desarrollo del Modelamiento del sistema**

El modelamiento del sistema incluye fundamentalmente para su ejecución un Flujo Optimo de Potencia AC (OPF-AC), en donde intervendrán todos los datos correspondientes del sistema de 14 barras de IEEE para optimizarlo mediante el GAMS que se detalló en [1], [2], [4], [16], [17]. El tema de optimización incluye distintos factores al momento del modelamiento, como primer factor es la función objetivo, restricciones de igualdad, restricciones de desigualdad, todas estas variables se verán implicados para realizar el modelo de optimización señalado en [23], [25].

### **3.1. Formulación matemática para flujos de potencia.**

El flujo de potencia que detallan los autores en [16], [21], [26], sirven como estudio de sistemas eléctricos de potencia con el objetivo de planificar, diseñar y operar dichos sistemas para la obtención de resultados que ayuden al análisis de los sistemas. Mediante las distintas condiciones operativas que se encuentran referenciados en [6], [8], [9], [12], [27], que mencionan que los sistemas de potencia son complejos ya que trabaja con diferentes parámetros donde se localizan potencias activas, potencias reactivas, magnitudes de voltaje, ángulos y datos de las líneas.

Para empezar a realizar el flujo de potencia hay que armar la matriz de admitancias que esta utilizado en [1], [2], también llamado Y de barra y mediante esta matriz se adquiere las siguientes ecuaciones con las que se trabajará en el modelamiento del (OPF).

$$G_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x l_{ij}^2} \quad (1)$$

$$B_{ij} = \frac{x l_{ij}}{r_{ij}^2 + x l_{ij}^2} \quad (2)$$

$$y_{ij} = |y_{ij}| \cos \theta + j |y_{ij}| \sin \theta_{ij} = G_{ij} + j B_{ij} \quad (3)$$

Donde:

$G_{ij}$ ; Conductancia serie de la línea calculada mediante (1).

$B_{ij}$ ; Susceptancia serie de la línea calculada mediante (2).

$r_{ij}$ ; Resistencia serie de la línea ij.

$x l_{ij}$ ; Reactancia inductiva de la línea ij.

$y_{ij}$ ; Cálculo para la matriz de admitancias.

Además se obtendrá la matriz de admitancia propia.

$$Y_{ii} = -\sum_{j=1}^n Y_{ij} - Y_{in} < \theta_{in} \quad (4)$$

Donde:

$Y_{ii}$ ; Admitancia propia.

La matriz de admitancias mencionadas en [1], [2], está constituida por los elementos del sistema donde intervienen las ecuaciones de corriente de cada barra. Representada en la siguiente ecuación.

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (5)$$

Donde:

$I_i$ ; Corrientes de los nodos.

La ecuación (5) representa la corriente (I) inyectada en la barra i, ya que puede tener n barras el sistema al cual se desea trabajar y modelarlo. Mediante la ecuación (5) se obtendrá la potencia activa y reactiva.

Para generalizar se emplea un sistema de 14 barras de la IEEE, por lo que se plantea las ecuaciones (6) y (7).

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$I_i = Y_{i1} V_1 + Y_{i2} V_2 + \dots + Y_{in} V_n = Y_{ii} V_i + \sum_{n=1}^N Y_{in} V_n, i \in N \quad (7)$$

Las ecuaciones (8) y (9) sirven para determinar las potencias tanto activas como reactivas en cada uno de los nodos expresadas [4]–[6], [8].

$$P_i - jQ_i = Y_{ii} V_i^2 + V_i * \sum_{n=1}^N Y_{in} V_n \quad (8)$$

$$P_i - jQ_i = |Y_{ii} V_i^2| < (\theta_{ii}) + \sum_{n=1}^N |V_i Y_{in} V_n| < (\theta_{in} + \delta - \delta i), i \in N \quad (9)$$

Además los autores en [1], [2], relacionan las ecuaciones (8) y (9) descomponiéndoles los componentes reales e imaginarios para conseguir las potencias activas  $P_i$  y potencia reactiva  $Q_i$  de cada nodo.

$$P_i(V, \theta) = |V_i|^2 [G_{ii} + \sum_{k=1}^N |V_i V_k| [G_{ik} \cos(\theta_k - \theta_i) - B_{ik} \sin(\theta_k - \theta_i)], i \in N \quad (10)$$

$$-Q_i(V, \theta) = |V_i|^2 [B_{ii} + \sum_{k=1}^N |V_i V_k| [B_{ik} \cos(\theta_k - \theta_i) - G_{ik} \sin(\theta_k - \theta_i)], i \in N \quad (11)$$

Donde;

$P_i$ ; Flujo de potencia activa.

$Q_i$ ; Flujo de potencia reactiva.

$N$ ; Cantidad de nodos del sistema.

$|V_i, V_k|$ ; Módulos de voltaje en el nodo i y del nodo k.

### 3.2. Formulación matemática para la estabilidad de voltaje basado en índices de estabilidad.

Los autores en [28], mencionan que la estabilidad de voltaje se relaciona con la capacidad que posee el sistema eléctrico de potencia (SEP) demostrado en [19], [23], [24]. Indica que hay que mantener

una magnitud de voltaje estable en los límites operativos en todas las barras, bajo sus respectivas restricciones y formas operativas.

En las referencias [21], [23], menciona que mediante los índices de estabilidad se puede detectar barras críticas y a partir de aquello, estas inestabilidades son identificadas por medio de los índices como indica [21]. El modelamiento procede a formular ecuaciones de flujo de potencia para las líneas de transmisión que se encuentran en el sistema. En la ecuación (12) señalado por [21], [23], [29], se observa como actuarían los índices de estabilidad para el modelado de optimización de la investigación ya que los componentes involucrados están declarados en el flujo óptimo de potencia.

$$SI_k = V_i^4 - 4(P_k * R_{ik} + Q_k * X_{ik})V_i^2 - (P_k * X_{ik} + Q_k * R_{ik})^2 \quad (12)$$

Donde:

$SI_k$ ; Índice de estabilidad en el nodo k.

$V_i$ ; Voltaje en el nodo i.

$P_k$ ; Demanda de potencia activa en el nodo k.

$Q_k$ ; Demanda de potencia reactiva en el nodo k.

$R_{ik}$ ; Resistencia de la línea entre los nodos i y k.

$X_{ik}$ ; Reactancia de la línea entre los nodos i y k.

### 3.3. Desarrollo de optimización aplicada a técnicas de conmutación.

Para el desarrollo de la investigación se presenta a continuación la solución de optimización empleado en [30], en la cual el objetivo es minimizar las pérdidas activas del sistema. Los autores en [1], [5], mencionan que los flujos óptimos de potencia (OPF) ayudan a optimizar las distintas condiciones de operación de un sistema eléctrico de potencia, un OPF-

AC mencionado en [4], [6], [9], señala que ajusta cantidades para optimizar una función objetivo descrita en la ecuación (13) sujeto además a un conjunto de restricciones operativas que se va a plantear a continuación en las ecuaciones.

Las referencias [5], [17], mencionan que la función objetivo representa un desempeño óptimo al momento de un análisis señalado en [16], [18], [30], la seguridad del sistema es fundamental, por ello además del flujo óptimo de potencia (OPF-AC) se introduce el tema de estabilidad de voltaje mencionados en [3], [11], [13], [16], basados en índices de estabilidad que están señalados en [21], [23], [29], [31]. Mediante los índices de estabilidad marcados en [23], [29], se puede mantener a los sistemas en un margen de estabilidad operativo.

Las ecuaciones (14) y (15) están descritas en [1], [2], [32], [33], ya que los autores señalan como intervienen las ecuaciones en flujo de potencia tanto la potencia activa, el flujo de potencia reactiva. Igualmente los autores indican en [6], [8], las ecuaciones de balance de potencial que son una de las restricciones para el modelado que están expresadas en las ecuaciones (16) y (17).

Además se señala una restricción de los límites de voltaje en la ecuación (18), los límites de los ángulos del voltaje en la ecuación (19). Y por último tenemos los límites de potencias tanto activas como reactivas mencionadas en [2], [4], [34], que se encuentran expresados en las ecuaciones (20) y (21).

$$FO = \text{Min} \sum_{i=1}^N (P_{gi} - P_{di}) \quad (13)$$

Sujeto a:

$$P_i(V, \theta) = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{k=1}^N |V_i V_k| [G_{ik} \cos(\theta_k - \theta_i) - B_{ik} \sin(\theta_k - \theta_i)] \quad (14)$$

$$-Q_i(V, \theta) = |V_i|^2 B_{ii} + \sum_{k=1}^N |V_i V_k| [B_{ik} \cos(\theta_k - \theta_i) - G_{ik} \sin(\theta_k - \theta_i)] \quad (15)$$

$$P_{gi} - P_{di} - P_i = 0 \quad (16)$$

$$Q_{gi} - Q_{di} - Q_i = 0 \quad (17)$$

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad (18)$$

$$\theta_{i \min} \leq \theta_i \leq \theta_{i \max} \quad (19)$$

$$P_{gi \min} \leq P_{gi} \leq P_{gi \max} \quad (20)$$

$$Q_{gi \min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi \max} \quad (21)$$

Dónde:

$P_{gi}$ ; Potencia activa generada en el nodo i.

$P_{di}$ ; Potencia activa demandada en el nodo i.

$Q_{gi}$ ; Potencia reactiva generada en el nodo i.

$Q_{di}$ ; Potencia reactiva demandada en el nodo i.

$P_i$ ; Inyección neta de potencia activa en el nodo i.

$Q_i$ ; Inyección neta de potencia reactiva en el nodo i.

$G_{ik}$ ; Parte real de la matriz de admitancias nodal.

$B_{ik}$ ; Parte imaginaria de la matriz de admitancia nodal.

$\theta_{ik}$ ; Angulo entre los nodos i y k

$V_i$ ; Voltaje en el nodo i en pu.

$V_k$ ; Voltaje en el nodo k

$V_{i \min}, V_{i \max}$ ; Voltajes máximos y mínimos permitidos en el nodo i.

$P_{gi \min}, P_{gi \max}$ ; Límites máximos y mínimos de potencia activa en el nodo i.

$Q_{gi \min}, Q_{gi \max}$ ; Límites máximos y mínimos de potencia reactiva en el nodo i.

## 4. Algoritmo de resolución

En la resolución del modelamiento de optimización incluye diversas herramientas las cuales proveen una gran ayuda al momento de aplicar la solución del problema, en primera instancia es poseer una base de datos en Excel que en el caso de la investigación son los datos de 14 barras de la IEEE donde se encuentran los datos de cada elemento y los datos de cada variable, también para la optimización se utiliza el programa GAMS el cual es una herramienta matemática para resolver los distintos problemas de optimización, y en esta herramienta se resuelve el flujo óptimo de potencia para obtener los datos operativos del sistema. Frente a los resultados alcanzados gracias al GAMS además se hará uso de la herramienta DigSilent que es un programa en donde podemos ir simulando y haciendo pruebas para contrastar los resultados adquiridos tanto del GAMS como del DigSILENT.

### Algoritmo de Optimización

**Paso 1:** Ingreso de base datos

Datos de 14 barras IEEE

**Paso 2:** Leer: Datos iniciales de voltajes, ángulos, potencias, generadores, nodos, cargas y líneas

**Paso 3:** Ingreso de ecuaciones a GAMS

Set: flujo de potencia activa  
 $P_i$

Set: Flujo de potencia reactiva  
 $Q_i$

**Paso 4:** restricciones de igualdad

Set: Balance de potencias activa y reactiva.

$$P_{gi} - P_{di} - P_i = 0$$

$$Q_{gi} - Q_{di} - Q_i = 0$$

**Paso 4.1:** Restricciones de desigualdad

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max}$$

$$\theta_{i \min} \leq \theta_i \leq \theta_{i \max}$$

$$P_{gi \min} \leq P_{gi} \leq P_{gi \max}$$

$$Q_{gi \min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi \max}$$

**Paso 4.2:**

Ecuación de índices de estabilidad.

$$SI_k = V_i^4 - 4(P_k * R_{ik} + Q_k * X_{ik})V_i^2 - (P_k * X_{ik} + Q_k * R_{ik})^2$$

**Paso 4.3:** Minimización de la F.O, minimización de pérdidas.

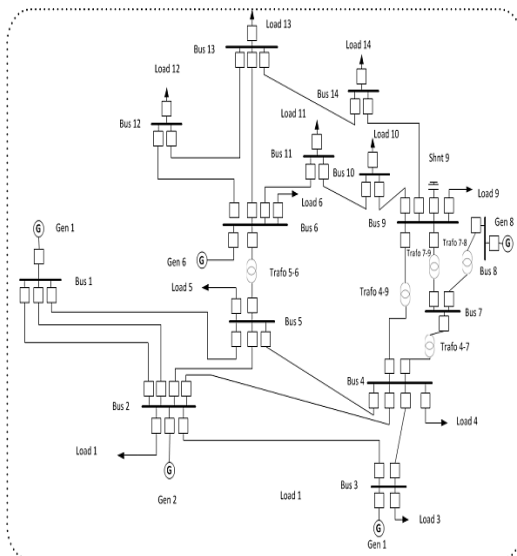
$$FO = \text{Min} \sum_{i=1}^N (P_{gi} - P_{di})$$

**Paso 5:** Visualizar los resultados comparando los datos tanto en GAMS como en DigSILENT.

**Paso 6.** Fin del algoritmo

## 5. Análisis de resultados.

Para el análisis de los resultados el sistema eléctrico simulado es el modelo de las 14 barras de la IEEE, mostrado en la figura 2. Que mediante el modelo se trabajará primeramente sacando de servicio a una línea de transmisión y visualizar su estado para comparar los datos, de igual manera sacando dos líneas de transmisión para observar su comportamiento y analizar los resultados. Mediante este sistema se obtendrá los datos simulados en el DigSILENT para el estudio y comparación de los resultados alcanzados, además se obtendrá los datos adquiridos por GAMS y saber que el modelamiento planteado es efectivo.

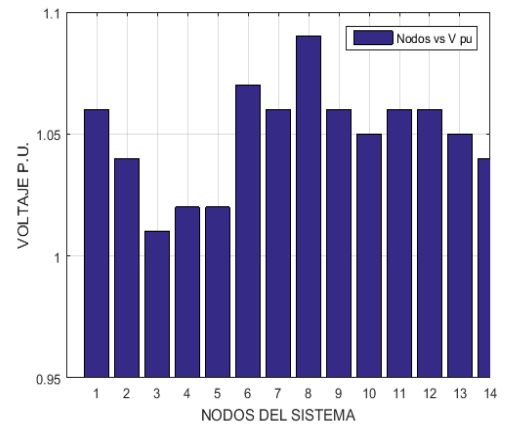


**Figura 2.** Modelo de las 14 Barras de la IEEE.

## 5.1. Análisis en condiciones iniciales del sistema.

Para el análisis en condiciones iniciales se procederá a correr el flujo del modelo de 14 barras de la IEEE en el programa DigSILENT, que es una herramienta la cual realiza las distintas pruebas y análisis de los sistemas eléctricos de potencia. Además con los datos arrojados por el programa se procederá a graficar los voltajes de las 14 barras en pu, para así empezar a analizar el sistema. Antes de efectuar la optimización en el programa GAMS.

Como se observa en la Figura 3 los datos de las barras son obtenidos directamente del DigSILENT que en el caso del modelo de 14 barras son los voltajes pu, tales voltajes mencionados son ya preestablecidos por el programa así que es una forma de corroborar como está actuando el sistema en condiciones iniciales.



**Figura 3.** Datos iniciales de barras DigSILENT

Como se observa en la figura 3 la mayoría de los voltajes sobrepasa el 1 pu. Esto demostraría que las barras están sobretensionadas ya que por las normas internacionales los sistemas de transmisión trabajan en el rango de 0.95 a 1.05, en el estudio lo que se trata es tener un sistema estable y hacia ello aplicamos los conceptos y modelamientos. Para que el sistema tenga una respetable estabilidad de voltaje, lo óptimo es tener en cada

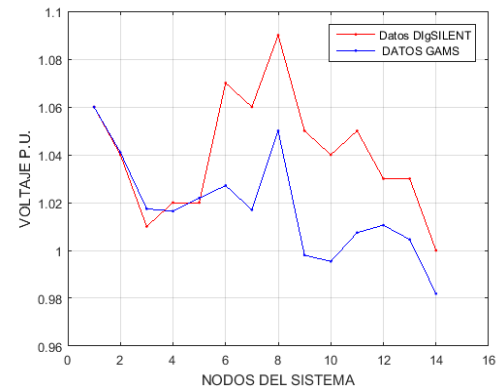
barra el 1 pu. Pero se conoce que en todos los sistemas existen pérdidas, contingencias, fallos, eventualidades, sobretensiones, cortocircuitos y frente a ello se tratará de aproximarse al 1pu, con apoyo de las Técnicas de conmutación.

Estará enfocado en la estabilidad que es una parte de la investigación el cual se va afrontar y lograr resolver el problema, añadiendo además que se empleará las técnicas de conmutación para lograr la minimización de pérdidas. También hay que mencionar que la barra 1 es Slack, por lo tanto el voltaje pu ya está establecido como voltaje de referencia.

## 5.2. Análisis del sistema frente a la salida abrupta de una L/T.

Para el análisis en este punto como se menciona para la simulación se procederá a desconectar una línea de transmisión del sistema de 14 barras. La línea de interconexión escogida que saldrá de funcionamiento es L6-L13 para el análisis, esta línea de transmisión fue escogida porque en las interconexiones de las barras 6 y 13, existen otras rutas con las cuales se puede realizar la técnica de conmutación que es lo que afronta el estudio de la investigación y visualizar que datos obtenidos al desconectar la línea de transmisión. Mediante la optimización realizada se podrá visualizar como el modelamiento está trabajando para mantener la estabilidad de voltaje en las barras.

En la figura 4 se analiza cómo se comporta el sistema enfocado en la estabilidad de voltaje de las 14 barras del sistema tanto en el Programa DigSILENT como en el GAMS.



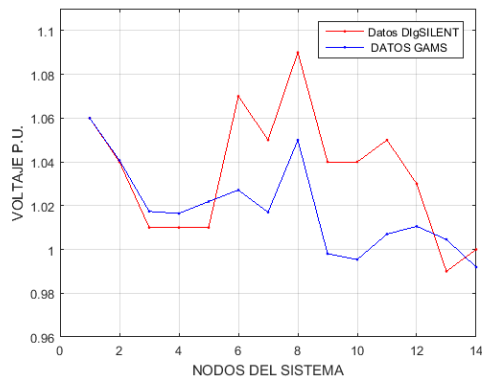
**Figura 4.** Datos obtenidos frente a desconexión de una L/T.

Frente a la gráfica expuesta se puede analizar los voltajes conseguidos tanto el flujo corrido en DigSILENT, de igual forma el flujo optimizado en GAMS. Como demuestra la gráfica se ve claramente como la optimización basado en estabilidad de tensión tiende a llegar a 1pu, cómo se denominó anteriormente la interconexión entre L6 Y L3 se refleja en la línea roja una sobrecarga la cual esto produce y producirá daños y afectaciones al sistema e inestabilidad. Comparando con los resultados del GAMS se observa que la línea azul en los nodos 6 y 13 hay una reducción considerable que se acerca al 1 pu que es lo optima y con ello garantizar un servicio continuo y satisfacer el objetivo dado anteriormente.

## 5.3. Análisis del sistema frente a la salida abrupta de dos L/T.

De igual forma como se visualiza en la figura 5, frente a las desconexiones de las líneas L6-L13 Y L2-L4. Se refleja el comportamiento del sistema ante la presencia de la salida de las dos líneas de transmisión, las barras que se desconectaron sufren un incremento de tensión lo cual es perjudicial para el sistema y con el modelamiento de optimización se mantiene cerca del 1 pu. Y así tener un sistema estable y satisfacer el problema de la inestabilidad de voltaje en las barras.

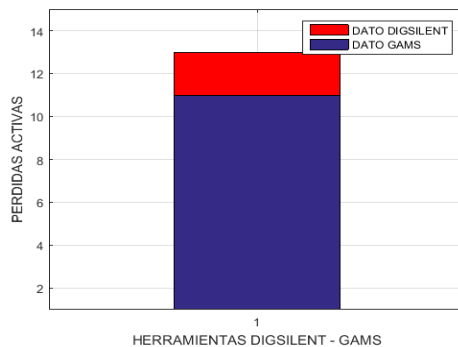




**Figura 5.** Datos frente a desconexión de 2 L/T

#### 5.4. Análisis minimización de perdidas activas del sistema.

Uno de los beneficios de las técnicas de conmutación en la parte de transmisión es la minimización de perdidas, por lo tanto que en el modelamiento se logró reducir las pérdidas activas del sistemas, donde en la gráfica 6 se ve reflejado que 2 MW se ha logrado reducir mediante el programa de optimización y con ello se cumplió satisfactoriamente lo planteado en la investigación.



**Figura 6.** Minimización de perdidas activas del sistema.

### 6. Conclusiones.

En este trabajo se asimiló una metodología enfocándose en las Técnicas de Conmutación para desglosar los diferentes parámetros en el sistema de transmisión como la estabilidad de voltaje, índices de estabilidad y el modelamiento de optimización. El método mencionado utiliza un análisis de flujos óptimos de

potencia (OPF-AC), que es la base para aplicar las soluciones a los problemas que se trazó en principio del artículo. Se observó también que a través de la técnica conmutación de transmisión permite al sistema tener muchos beneficios operativos, costos, flexibilidad, continuidad del servicio eléctrico y la seguridad. También estas técnicas ayudan a la gestión de la demanda por tal razón que la conmutación puede abastecer todas las demandas del sistema con los márgenes operativos correctos de cada componente al que está sujeto el sistema.

El estudio de los índices de estabilidad de voltaje es una enorme ayuda a los sistemas eléctricos de potencia (SEP), ya que estos sistemas están propensos a fallas, caída de tensión, sobretensión congestionamientos e inestabilidad y es ahí donde entran a trabajar estos índices enfocados en la estabilidad de voltaje.

El modelo de optimización descrito inicialmente, se utilizó y analizó una programación no lineal (NLP) mediante aquello ayuda a obtener un óptimo rendimiento del sistema en la parte de estabilidad y reducción de pérdidas.

Por medio del estudio, análisis y aplicación de este modelamiento se garantiza la viabilidad de la solución del problema bajo los distintos criterios de seguridad de los sistemas eléctricos de potencia.

La herramienta matemática de GAMS es útil para estos sistemas complejos en los cuales involucran diferentes parámetros que hay que estudiarlos y analizarlos, pero gracias a ello se puede solucionar problemas y mejorarlos.

En este trabajo se propuso una metodología para optimizar un sistema eléctrico de potencia con fines que garanticen que las técnicas de conmutación vayan encaminado a

satisfacer la estabilidad de voltaje en las barras del sistema frente a pérdidas o desconexiones de líneas de transmisión y evitando la inestabilidad de voltaje en las barras por lo que al analizar se cumplió las metas satisfactoriamente resolviendo los problemas.

### Referencias

- [1] R. Aazami, F. Soltanian, M. Moradkhani, and J. Rashidbeigi, "Transmission switching in joint energy and spinning reserve markets considering stability criteria," *Int. J. Electr. Eng. Informatics*, vol. 6, no. 4, pp. 740–754, 2014.
- [2] R. Aazami, M. R. Haghifam, F. Soltanian, and M. Moradkhani, "A comprehensive strategy for transmission switching action in simultaneous clearing of energy and spinning reserve markets," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 64, pp. 408–418, Jan. 2015.
- [3] H. Ahmadi, "Transmission System Reconfiguration for Congestion Management Ensuring Transient and Voltage Stability," *Environ. Electr. Eng. (EEEIC), 2013 13th Int. Conf.*, 2013.
- [4] T. Akbari and M. Tavakoli Bina, "A linearized formulation of AC multi-year transmission expansion planning: A mixed-integer linear programming approach," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 114, pp. 93–100, Sep. 2014.
- [5] M. Bachtiar Nappu, A. Arief, and R. C. Bansal, "Transmission management for congested power system: A review of concepts, technical challenges and development of a new methodology," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 572–580, Oct. 2014.
- [6] S. Bruno, V. E. Orabona, M. Di Lullo, G. Felici, M. La Scala, and V. E. Orabona, "Tight Unit Commitment models with Optimal Transmission Switching: Connecting the dots with Perturbed Objective Function," *Complex. Eng. (COMPENG), 2014*, 2014.
- [7] C.-L. Chuang, Y.-C. Wang, C.-H. Lee, M.-Y. Liu, Y.-T. Hsiao, and J.-A. Jiang, "An Adaptive Routing Algorithm Over Packet Switching Networks for Operation Monitoring of Power Transmission Systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 2, pp. 882–890, 2010.
- [8] S. Bruno, M. D'Aloia, G. De Carne, and M. La Scala, "Controlling transient stability through line switching," in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on*, 2012, pp. 1–7.
- [9] C. Coffrin, H. L. Hijazi, K. Lehmann, and P. Van Hentenryck, "Primal and dual bounds for Optimal Transmission Switching," *2014 Power Syst. Comput. Conf.*, pp. 1–8, 2014.
- [10] G. M. Dimirovski, "Exponential stability for switched delay systems based on average dwell time technique and Lyapunov function method," *2006 Am. Control Conf.*, p. 5 pp., 2006.
- [11] S. Golabi and S. Tanhaeidilmaghani, "Analysis of Various Transmission Line Switching Overvoltage Limitation Techniques: i \_," *Electr. Power Energy Convers. Syst. (EPECS), 2013 3rd Int.*

- Conf.*, pp. 0–6, 2013.
- [12] N. Gupta, R. Shekhar, and P. K. Kalra, “Computationally efficient composite transmission expansion planning: A Pareto optimal approach for techno-economic solution,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 917–926, Dec. 2014.
  - [13] H. Golpira, H. Bevrani, and A. Hesami Naghshbandy, “An approach for coordinated automatic voltage regulator–power system stabiliser design in large-scale interconnected power systems considering wind power penetration,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 6, no. 1, p. 39, 2012.
  - [14] Z. Jelonek, “A comparison of transmission systems,” *Commun. Theory*, pp. 44–81, 2016.
  - [15] B. Keyvani, M. Karbalaye Zadeh, and H. Lesani, “Stability enhancement of multi-machine systems using adaptive reclosing of transmission lines,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 62, pp. 391–397, Nov. 2014.
  - [16] M. Khanabadi, H. Ghasemi, and M. Doostizadeh, “Optimal Transmission Switching Considering Voltage Security and N-1 Contingency Analysis,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 542–550, 2013.
  - [17] M. Khanabadi and C. Wang, “Security-Constrained Unit Commitment Considering Voltage Stability: A Parallel Solution,” *North Am. Power Symp. (NAPS)*, 2016, 2016.
  - [18] A. Khodaei and M. Shahidehpour, “Transmission switching in security-constrained unit commitment,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 4, pp. 1937–1945, 2010.
  - [19] M. B. Wafaa, “A Market - Based Approach of OPF with Consideration of Voltage Stability Improvement,” *Power Energy Soc. Gen. Meet. (PESGM)*, 2016, 2016.
  - [20] C. D. Vournas, C. Lambrou, and P. Mandoulidis, “Voltage Stability Monitoring from a Transmission Bus PMU,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8950, no. 1, pp. 1–1, 2016.
  - [21] K. V Kumar and M. P. Selvan, “Planning and Operation of Distributed Generations in Distribution Systems for Improved Voltage Profile,” *2009 IEEE PES Power Syst. Conf. Expo.*, vol. 620015, pp. 1–7, 2009.
  - [22] Y. Liu, Q. H. Wu, and X. X. Zhou, “Coordinated Switching Controllers for Transient Stability of Multi-Machine Power Systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 5, pp. 3937–3949, 2016.
  - [23] G. Nannapaneni, S. Member, T. M. Masaud, and R. Chaloo, “A Comprehensive Analysis of Voltage Stability Indices in the Presence of Distributed Generation,” *Technol. Sustain. (SusTech)*, 2015 *IEEE Conf.*, pp. 96–102, 2015.
  - [24] T. Ngo, M. Lwin, and S. Santoso, “Analysis of Distance Protection in Low Frequency AC Transmission Systems,” *Power Energy Soc. Gen. Meet. (PESGM)*, 2016, pp. 1–5, 2016.
  - [25] D. C. Pinh and C. A. Castro, “Transmission System Overload,” *PowerTech*, 2015.
  - [26] A. Rastgou and J. Moshtagh, “Improved harmony search algorithm for transmission expansion planning with

- adequacy–security considerations in the deregulated power system,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 60, pp. 153–164, Sep. 2014.
- [27] C. Prieur, A. Girard, and E. Witrant, “Stability of switched linear hyperbolic systems by Lyapunov techniques,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 59, no. 8, pp. 2196–2202, 2014.
- [28] M. Sagara and M. Furukakoi, “Voltage Stability Improvement to Power Systems with Energy Storage Systems,” *Harmon. Qual. Power (ICHQP), 2016 17th Int. Conf.*, pp. 7–10, 2016.
- [29] C. Vásquez and S. Espinosa, “Óptima Ubicación De Fuentes De Generación Distribuida Basado En El Perfil De Tensión De Sistemas De Distribución Eléctrica,” 2016.
- [30] T. H. Sikiru, A. A. Jimoh, Y. Hamam, Y. Alayli, and J. T. Agee, “Transmission dispatch for loss minimisation using linearised power flow equations in mixed integer programming,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 62, pp. 855–861, Nov. 2014.
- [31] D. Wang, “Probabilistic Static Voltage Stability Security Assessment for Power Transmission System,” *Power Energy Eng. Conf. (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*, pp. 5–8, 2010.
- [32] W. Caisapanta and D. Carrión, “Expansión de Sistemas de Transmisión Eléctrica Usando Criterios de Óptima Potencia AC,” Universidad Politecnica Salesiana, 2016.
- [33] D. Chavez and S. Espinoza, “Optimizacion del uso de la potencia reactiva en el sistema electrica ecuatoriano mediante la programacion no lineal,” 2015.
- [34] S. P. Torres, S. Member, C. A. Castro, and S. Member, “Practical Heuristic Approach to Solve the Optimal Transmission Switching Problem for Smart Grids,” *Transm. Distrib. Conf. Expo. - Lat. Am. (PES T&D-LA), 2014 IEEE PES*, no. 1, 2014.